

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06123

研究課題名（和文）航空LiDARデータを利用した落葉広葉樹林冠の3次元構造の解析方法の開発

研究課題名（英文）Development of a three dimensional structure analysis method of deciduous broadleaf forest using airborne LiDAR data

研究代表者

栗屋 善雄（Awaya, Yoshio）

岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授

研究者番号：90353565

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：岐阜県生井川上流の落葉広葉樹林を対象に2011年8月に取得された航空レーザーデータを利用して、林冠の3次元構造に基づいて葉面積指数(LAI)を推定する方法を開発した。単木の葉量と垂直分布を表すモデルを利用して毎木調査データからプロット単位で葉面積の垂直分布を求めた。樹冠高を標準化して0-33%、34-66%、67-100%の高さ別に葉面積を求め、レーザーパルスの透過率とBeer-Lambert則に基づいて階層ごとに吸光係数を求めた。吸光係数を各層に当てはめてBeer-Lambert則でLAIを推定したところ、推定値の飽和現象が改善され樹冠を1層として扱う従来の推定法より推定精度を大幅に改善できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

樹木の葉は光合成により大気中の二酸化炭素から炭素を固定して木部に貯蔵する。樹木が固定する炭素量を正確に推定するには葉量（葉面積指数：LAI）を正確にマッピングする必要があるが、LAI推定に広く利用されているBeer-Lambert則ではLAIが4を超える場合には推定値が飽和して高精度の推定は困難だった。本研究では林冠を3層（葉層、中間層、幹層）に分けてLAIの推定精度を大幅に改善できた。森林の炭素固定能を評価する基礎データであるLAIの推定精度が向上することにより林の炭素固定能の評価精度が向上し、ひいては温暖化に対する適応策の改善に貢献すると期待される。

研究成果の概要（英文）：A leaf area index (LAI) estimation method for deciduous broadleaf forest was developed based on the 3D structure of canopies using an airborne laser scanning data obtained in August, 2011 in the Namai river basin, Gifu prefecture. Vertical leaf area distribution per plot was computed using tree measurement records and models which estimate leaf amount and its vertical distribution. Extinction coefficients of the Beer-Lambert law for three normalized canopy height layers (0-33%, 34-66%, 67-100%) was estimated using the computed leaf area in the three layer. LAI was estimated using the extinction coefficients for the three layers and the Beer-Lambert law. Saturation in LAI estimation was reduced greatly and accuracy was improved much better than traditional methods by treating canopy as one layer.

研究分野：森林科学

キーワード：LiDAR 落葉広葉樹林 葉面積指数 Beer-Lambert則 吸光係数 階層別

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 広域の森林の群落構造を把握することは容易ではないが、航空レーザ(LiDAR)の表面高データ(DSM)に基づいた研究が実施されてきた。落葉広葉樹林ではLiDARはレーザビームの一部が地面に到達することが多く、LiDARデータで樹冠表層から林床に及ぶ林冠の構造を把握できる見込みが高かった。

(2) LiDARデータからPAIとPADの垂直分布を推定するにあたり、特に注目されているのがBeer-Lambert則を応用する方法だった(Monsi, Saeki 2005; Almeida et al. 2019)。

(3) LiDARデータを利用したLAIやPAIの推定の研究は海外では20例ほどあったが、国内では3例ほどで未開拓の分野だった。このため階層別に異なる吸光係数を与えてBeer-Lambert則でPAIを推定し、3次元の葉群分布推定の可能性を明らかにすることを目指した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、落葉広葉樹林において、航空機LiDARデータとBeer-Lambert則による適切な葉群三次元分布(PAI・PAD垂直分布)観測条件と解析方法を検討することである。

(1) 岐阜県高山市の落葉広葉樹二次林を対象に、2011年の航空機LiDARデータへBeer-Lambert則を適用して推定したPAI・PAD垂直分布と、2011年の毎木調査データに葉面積を推定するアロメトリー式と、樹木の葉面積の垂直分布を表すWeibull分布関数を適用して推定したLAI・LAD垂直分布から、経験的な吸光係数 $K_e$ を求める。

(2) 算出した吸光係数 $K_e$ を用いて航空機LiDARデータからPAI・PAD垂直分布を推定する。

(3) 従来の推定方法である相対光量子束密度、全天空写真、毎木調査データへのアロメトリー式適用、リタートラップ法の4方法によって測定したLAI(もしくはPAI)と、LiDARデータと吸光係数 $K_e$ から推定したLAIを比較して、それぞれの推定値の特徴を検証する。

### 3. 研究の方法

(1) 対象地は岐阜県高山市東部に位置する大八賀川支流の生井川の上流域とした。単木の葉量を推定するアロメトリー式を調整して2010~2012年に毎木調査を実施した40林分の調査結果に適用し、高さ1mの階層を設定して葉面積密度(LAD)の垂直分布をワイブル分布で推定してその結果を林分単位のLAIとして集約する。

(2) 2011年の航空機LiDARデータからレーザー光線の林冠透過率を算出し、Beer-Lambert則に基づいて、吸光係数 $K=1$ とした時の有効植物面積指数(以下、ePAI)および有効植物面積密度(以下、ePAD)の垂直分布を推定する。

Beer-Lambert則を適用し、階層化したLiDARの樹冠高DCHMパルスデータからePAD垂直分布を推定する。まず、DCHMの1m間隔の階層ごとの点数から、各層の上部から入射したパルスと各層の下部から透過したパルスを算出する。次に、各層に次式のBeer-Lambert則を適用し、ePAD垂直分布を算出する。

$$PAD_i = -LN(I_{out_i} / I_{in_i}) \times 1 / K \quad (1)$$

ここで、 $PAD_i$ : 層*i*におけるPAD、 $I_{in_i}$ : 層*i*の上部から入射するパルス数、 $I_{out_i}$ : 層*i*を透過するパルス数、 $K$ : 吸光係数( $K=1$ の場合、ePAD)である。

下層植生の上部(第2層)より上の $PAD_i$ の積算値がPAIである。併せてPPFD計測結果に対応するパルスの透過率を計算する。

(3) 2019~2020年に林分構造(材積、樹高)の異なる5地点のプロット(Plot-1~5)でリタートラップを設置し、相対光量子束密度(PPFD)を測定し、全天空写真を撮影してLAIやPAIを推定する。

(4) 2011年毎木調査データから推定したLAI・LADの垂直分布と、LiDARデータで推定したePAI・ePADの垂直分布から、経験的な吸光係数 $K_e$ を求める。また、算出した吸光係数 $K_e$ によって航空機LiDARデータからLAI・LAD垂直分布を推定する。

(5) DCHM-2011によるePAI、PAIの推定値とPPFD計測と全天空写真解析で推定したePAIおよび、リタートラップ、アロメトリー式で推定したLAIを比較して特徴を明らかにする。最適と考えられる吸光係数 $K_e$ を利用してPAIの分布を図化して特徴を明らかにする。

### 4. 研究成果

(1) 樹木一本あたりの葉面積(LA)を推定するアロメトリー式は、小見山ら(2002)が岐阜県飛騨地方で1990年~1993年に伐倒調査した落葉広葉樹のデータを利用した。伐倒された樹木で計測された樹種・胸高直径(DBH)・樹高(H)・葉面積(LA)を利用して、樹木1本あたりの葉面積(LA)の推定式を調整した。

$$\text{カンバ類のアロメトリー式 (n=12): } LAT=0.065 \times (D2H)^{0.768} \quad r^2=0.644 \quad (2)$$

$$\text{その他の樹種のアロメトリー式 (n=52): } LAT=0.150 \times (D2H)^{0.675} \quad r^2=0.817 \quad (3)$$

ここでLATは毎木の葉面積( $m^2$ )で、D2Hは $DBH^2H$ ( $cm^2 m$ )である。作成したアロメトリー式をプロット40地点の毎木調査データに適用し、各樹木のLAを求めた。

(2) アロメトリー式から算出したLAから、樹木の葉面積の垂直分布を表すWeibull分布関数(宇

都木 2009)により、プロット 40 地点の高さ 1メートル単位の LAD 垂直分布を求めた。代表して、Plot-1~5 の ePAD 垂直分布を図 1 a に示す。それぞれ特徴のある林冠構造が描写された。LAD の最高値が位置するのは、林冠上面から下方向に 4~6m 下がった層であった。上層樹冠形成木の樹高にばらつきが大きいと、この傾向は強くなった。

LiDAR のパルスはほとんどのプロットで地面に達して、樹冠の構造を把握できた (図 1 b)。厚い葉群が樹冠上層でパルスを反射するものの、平均約 0.7 点/m<sup>2</sup> のパルスが地面に達していた。ePAD の垂直分布は明らかに下層の構造を反映していた。しかし、ID 2010-16 のようにパルスが地表に達していないプロットも生じた。ePAI の推定値の分布を確認すると広域の森林でかなり一様で、平均値は 3.0 だった (図 2)。

(3)各プロットにリタートラップを 2 個ずつ設置した。8 月末から 12 月中旬まで約 2 週間おきにリタートを回収し、乾燥機で温度を 60℃に設定して 48 時間以上乾燥させた。葉を分別して乾燥重量を測定した後、単位重量あたりの葉面積を乗じて LAI を算出した。Plot-1~5 の林内の地上 1.5m に 2 カ所(I<sub>1.5m</sub>)と林外(I<sub>0</sub>)で量子センサー (SA-190, Li-Cor) を設置して PPF D を計測して相対量子密度 (rPPFD) を算出した。林外の PPF D は 150~700m 離れたオープンスペースで計測した。日射が安定した時間に計測された時間帯のデータを利用して、rPPFD (I<sub>1.5m</sub>/I<sub>0</sub>) の平均値を計算し、Beer-Lambert 則で ePAD と ePAI を推定した。Plot-1~5 の 3 カ所で全天写真を撮影し、ソフトウェア LIA32 (山本 2005) を使用して PAI を推定した。カメラを地上高 1.5m の三脚の上に真上を向けて設置し、樹冠上部の植物体が露出オーバーによって白飛びしないことを条件に露出を変化させて撮影した。

LAI あるいは PAI の地上での測定結果は 2 つのパターンに分かれた (図 3)。第 1 のパターンはアロメトリー式やリタートラップのように Plot-2, Plot-3, Plot-4 での LAI の

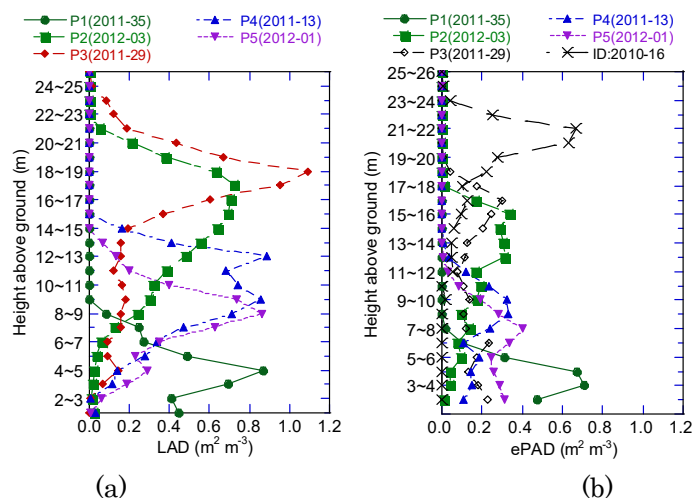


図 1 高さ 1メートル間隔の LAD と ePAD の垂直分布 (a)プロット調査データとアロメトリー式、ワイブル分布を利用して推定した LAD, (b)DCHM-2011 と Beer-Lambert 則で推定した ePAD。P1~P5 は Plot-1~Plot-5。

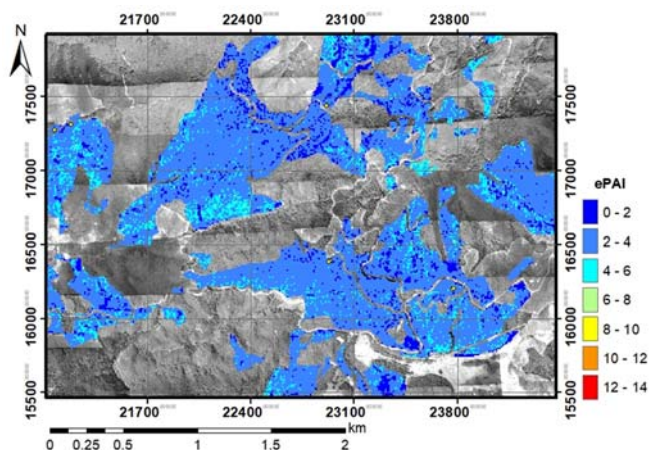


図 2 Beer-Lambert 式 (K=1) で推定した ePAI の分布図

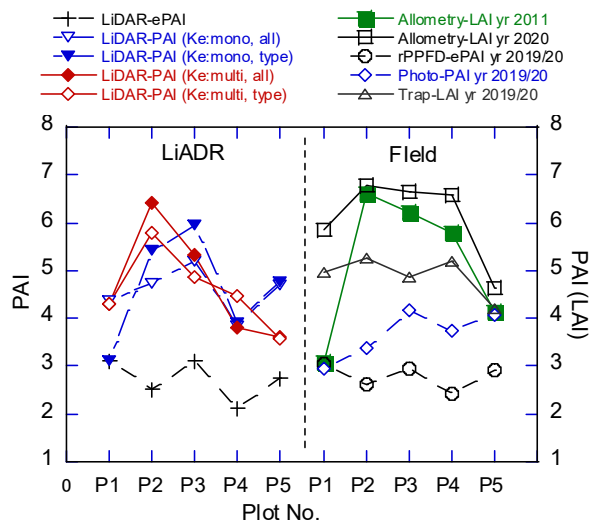


図 3 LAI と PAI の推定値の比較

推定値が Plot-1 と Plot-5 より大きいケースである。第2のパターンは Plot-3 と Plot-5 での PAI の推定値が Plot-2 と Plot-4 よりも大きい全天写真と PPFD によるケースである。全天写真と PPFD による PAI 推定は樹冠を1層として扱っていることと、幹の影響を受けることが特徴である。また、PAI の推定値は LAI の推定値よりも小さい。

(4) LiDAR 点群データから DCHM を計算して立方体に区切り (DCHM-2011)、各立方体に入射したパルス数と、透過したパルス数を用いて、Beer-Lambert 則で ePAI および ePAD 垂直分布を算出した。LiDAR データによる LAI 推定精度には点密度とパルス数が影響することから (Almeida et al. 2019), DCHM-2011 の点密度を 10m メッシュとして解析した。他の方法の LAD 垂直分布推定値と比較するため、DCHM-2011 格子点数データを他の測定方法に対応させて水平方向・垂直方向に集約した。その結果を 40 地点の毎木調査プロットに対応させて集計するとともに、10m メッシュとして画像化した。

吸光係数  $K_e$  を求めるにあたり、10m メッシュの DCHM-2011 をセグメント化した後にクラスター分析(Ward 法)によって、林分を3つの林型に分類した(図4)。地上高 10 m 以上に植物体が集中する Type 1 には、Plot-2,3 が含まれた。地上高 5 m から 10 m に植物体が集中する Type 2 には、Plot-4,5 が含まれた。地上高 2 m から 5 m に植物体が集中する Type 3 には、Plot-1 が含まれた。

2011 年の航空機 LiDAR データより推定した各プロットの階層別の ePAI・ePAD 垂直分布を、2011 年の毎木調査データで推定した LAI・LAD 垂直分布で割ることにより、40 地点のプロットについて、吸光係数  $K_e$  を推定した。吸光係数  $K_e$  を求めるにあたり、LiDAR による ePAD 垂直分布と、毎木調査データによる LAD 垂直分布を、プロット内の最大樹冠高を1として相対化した。地表面から最大樹冠高までを、0~33、34~66、67~100 (%) の3つに区分して、各区分帯と全層 0~100%の ePAD、LAD を集計した。

高さ別の吸光係数  $K_e$  を使用することで、LiDAR データによる PAD 垂直分布の推定結果は、

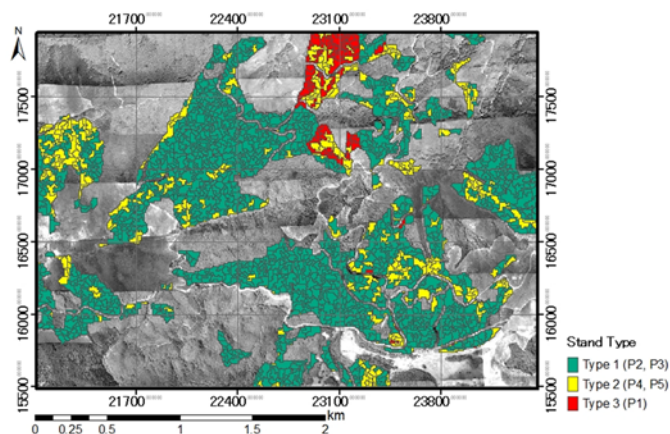


図4 DCHM-2011 を Ward 法で分類した結果

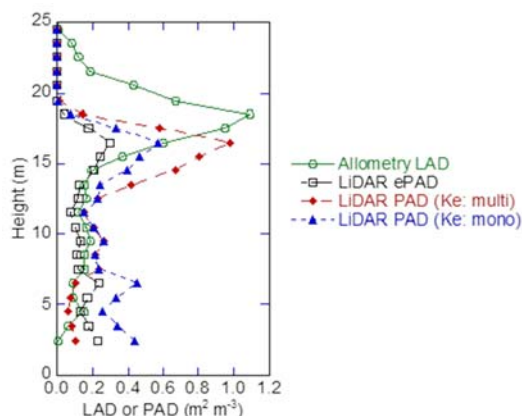


図5 DCHM-2011 とアロメトリ式による推定値

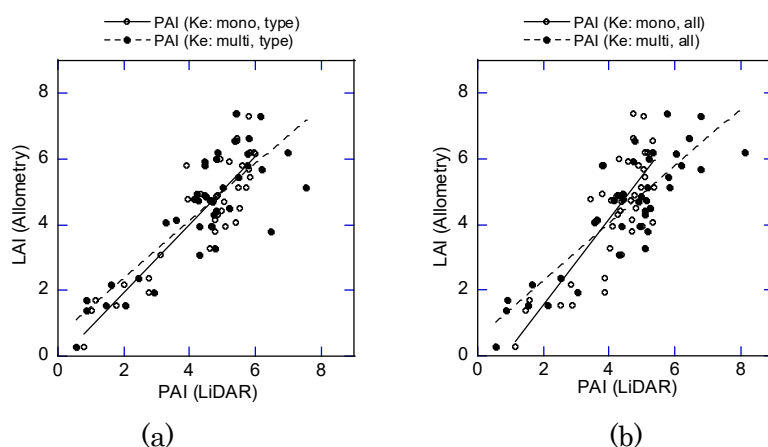


図6 アロメトリ式で求めた LAI と DCHM-2011 で推定した PAI の関係  
(a) LAI と3つの林型別に PAI を求めた場合。(b) LAI と林型一括で PAI を求めた場合。  
mono は樹冠を単層として扱った場合を multi は3層に分割した場合を指す。  
Type は林型を3つに分けた場合を、all は林型を一括した場合を表す。

アロメトリー式による LAI 垂直分布と対応が良くなった (図 5)。また、樹冠を 3 層として扱ったほうが単層として扱う場合よりアロメトリー式による推定値に分布傾向が近づいた。

(5) 地表面から最大樹冠高までを 3 階層に区分して、区分帯ごとに求めた経験的な吸光係数  $K_e$  を適用して得た PAI を、PAI ( $K_e$ : 単層) とする。区分せず求めた吸光係数  $K_e$  を適用して得た PAI を、PAI ( $K_e$ : 複層) とする。また、林型ごとの  $K_e$  を使用した場合 ( $K_e$ : 林型別) とし、全プロットを一括した  $K_e$  を使用した場合 ( $K_e$ : 林型一括) とする。これら層別と林型別の組み合わせで、4 通りの PAI を求め、散布図と回帰分析で検討した (図 6, 式(4)~(7))。

$$K_e \text{ (単層・林型別)}: \text{LAI} = -0.146 + 1.035 \times \text{PAI} \quad r^2 = 0.778 \quad (4)$$

$$K_e \text{ (複層・林型別)}: \text{LAI} = 0.640 + 0.873 \times \text{PAI} \quad r^2 = 0.691 \quad (5)$$

$$K_e \text{ (単層・林型一括)}: \text{LAI} = -1.027 + 1.296 \times \text{PAI} \quad r^2 = 0.626 \quad (6)$$

$$K_e \text{ (複層・林型一括)}: \text{LAI} = 0.522 + 0.875 \times \text{PAI} \quad r^2 = 0.738 \quad (7)$$

ここで LAI はアロメトリー式で推定された LAI, PAI は DCHM-2011 と Beer-Lambert 則で層別の  $K_e$  を用いて推定した PAI である。

地上調査で推定した LAI あるいは PAI と比較すると、DCHM-2011 に異なる  $K_e$  を与えて PAI を推定した場合、推定値はばらついた (図 3)。PAI ( $K_e$ : multi 複層) はアロメトリー式やリタートラップと同様のパターンを示したが、PAI ( $K_e$ : mono 単層) は全天写真と似たパターンになった。この傾向は森林タイプを分けても分けなくても同じだった。DCHM-2011 で  $K=1$  として PAI を推定した場合は rPPFD による推定値に似ていた。従って樹冠を層に分割して層ごとに  $K_e$  を与えることで、LiDAR データから LAI を推定することが可能になると考えられた。

プロットごとに、LiDAR データと吸光係数  $K_e$  から求めた PAI と、毎木調査データにアロメトリー式を適用して得た LAI からは有意な関係 ( $p < 0.001$ ) が得られた。 $K_e$  (単層・林型別) の場合が回帰式の切片がもっとも原点に近く、傾きが 1 に近かったが、PAI=6 付近で飽和していた (図 6 a)。一方、 $K_e$  (複層・林型一括) は飽和せず、決定係数は 2 番目に高かった (図 6 b)。これは DCHM-2011 を利用して PAI の散布図を作成する場合、 $K_e$  (複層・林型一括) が適していることを示している。そこで、DCHM-2011 と Beer-Lambert 則に  $K_e$  (複層・林型一括) を与えて PAI の分布図を作成した (図 7)。樹冠高がもっとも低い Type-3 で PAI が最低で、樹冠高がもっとも高い Type-1 では PAI のレンジが 4~14 程度まで広がった。しかしながら斜度が 30 度を超える急斜面では PAI が 10 を超えたことから、PAI の推定に斜面の傾斜が影響することが危惧された。

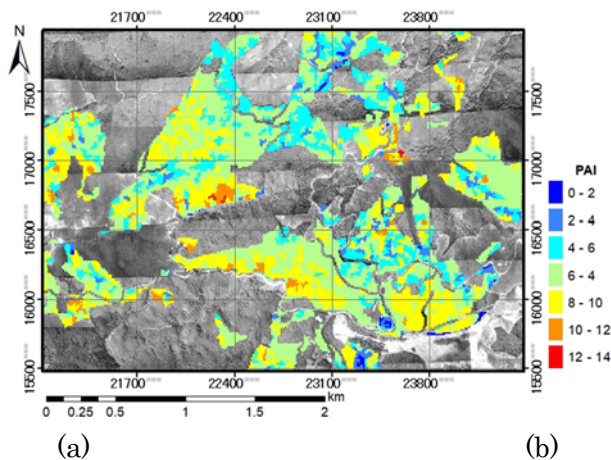


図 7 階層ごとの  $K_e$  を用いて DCHM-2011 と Beer-Lambert 則で推定した PAI 分布図  
階層 0~33%, 34~66%, 67~100% に対してそれぞれ  $K_e$  を 2.15, 0.52 と 0.30 を与えた

#### <引用文献>

1. Monsi, M.; Saeki, T.; Schortemeyer, M. On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Ann. Bot.* 2005, 95, 549-567.
2. Almeida, D.R.A.; Stark, S.C.; Shao, G.; Schiatti, J.; Nelson, B.W.; Silva, C.A.; Gorgens, E.B.; Valbuena, R.; Papa, D.A.; Brancalion, P.H.S. Optimizing the remote detection of tropical rainforest structure with airborne lidar: Leaf area profile sensitivity to pulse density and spatial sampling. *Remote Sens.* 2019, 11, 92. <https://doi.org/10.3390/rs11010092>.
3. 小見山章, 加藤正吾, 二宮生夫 (2002) 岐阜県飛騨地方における落葉広葉樹林の相対成長関係. *日林誌*, 84(2):3-5.
4. 宇都木 玄 (2009) 森林群落の葉群構造が林冠光合成生産量に及ぼす影響 —特に葉傾角の影響について—. 博士論文 (東京大学, 甲第 24728 号), 191pp.
5. 山本一清 (2005) LIA for Win32 (LIA32). <https://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/> (Access on April 6, 2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshio AWAYA, Kazuho ARAKI	4. 巻 15
2. 論文標題 2. 論文表題 Estimating Three-Dimensional Distribution of Leaf Area Using Airborne LiDAR in Deciduous Broad-Leaved Forest.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/rs15123043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 荒木一穂、粟屋善雄
2. 発表標題 航空機LiDARによる葉群三次元分布の把握- 落葉広葉樹林の事例-
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒木一穂、粟屋善雄
2. 発表標題 航空機LiDARによる葉面積指数推定の検討；落葉広葉樹林の事例
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒木一穂、粟屋善雄
2. 発表標題 航空機LiDARを利用した落葉広葉樹二次林におけるギャップ面 積縮小のモデリング
3. 学会等名 第9回中部森林学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------